

# ムカデはなぜあれほど機敏に動けるのだろうか？

## —多足ロボットを用いた実験的検証—

### 概要

ムカデは多くの足を持つ節足動物です。歩くときは、重力に抗して身体を支え、推進力や減速力を得るために、多くの足が地面に着いています。その際、これらの足は地面に拘束されてしまうため、急旋回のような素早く機敏な運動を行う障害となり得ますが、実際のムカデは非常に敏捷に歩きます。ムカデのような多くの足を用いる機敏な歩行生成メカニズムは未だ不明確です。

近年、青井 伸也 工学研究科講師らの研究グループはムカデの数理モデルを用いて、体軸を真っ直ぐにした直線歩行が歩行速度や体軸柔軟性（体節を繋ぐバネのバネ定数の逆数）に応じて不安定化し、蛇行運動に遷移することを明らかにしました。速度や柔軟性といったパラメータの変化により安定な状態が崩れ、蛇行運動のような安定な周期的振る舞いが新たに現れることを「ホップ分岐」と呼びます。本研究では、この分岐による直線歩行の不安定性が急旋回のような素早く機敏な運動を可能にすることを、多足ロボットが地面に置かれたターゲットに近づく急旋回実験を通して明らかにしました。身体特性などの制御による不安定性を利用した運動機能の向上は、生物の優れた運動戦略として重要な示唆を与えるものです。

本研究のような数理モデルやロボットを用いた研究方法は、生物の巧みな運動生成メカニズムの解明に大きく寄与すると期待されます。また、シンプルな制御ながら、不安定性などの特殊な力学特性を利用することで優れた運動機能を得ることは、今後様々な人工物の開発に役立つと期待されます。本成果は、7月22日18時（日本時間）、英国の学術誌 *Scientific Reports* に掲載されました。

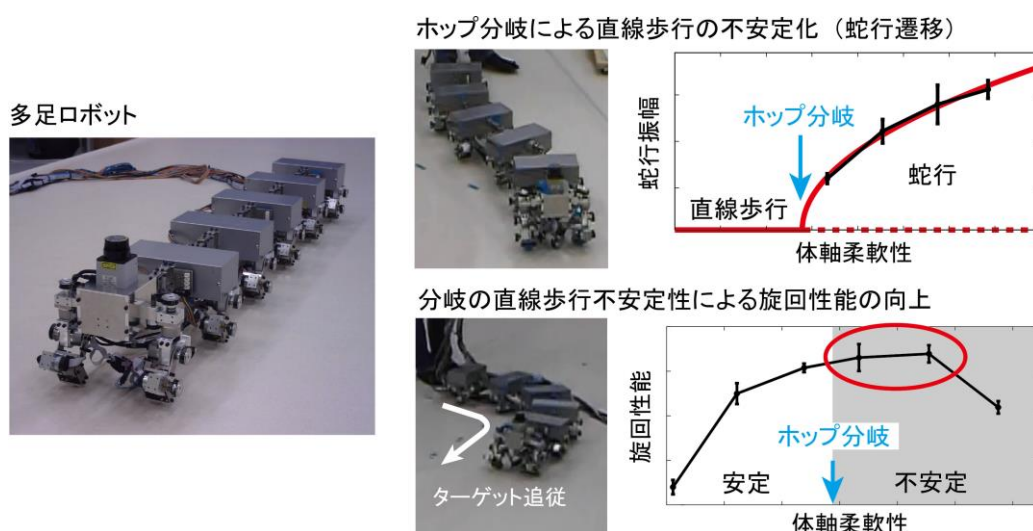


図 多足ロボットの体軸柔軟性に依存したホップ分岐による直線歩行の不安定化と旋回性能の向上

### 1. 背景

足を用いた歩行は、多くの生物や人工物にとって非常に効果的な移動手段です。特に、多くの足を用いる多足歩行は、足の数が多い分だけ転倒や足の損失にも頑健であるなど有利な点が多くあります。例えば、ムカデは多くの足を持つ節足動物です。その足の数は種族に応じて異なりますが、少なくとも15対

の足を持ち、中には191対も足を持つものもいます。しかしながら、足の数に応じて制御すべき自由度が増え、地面に拘束される足の数も増えてしまうため、その歩行を実現するには大きな困難が伴います。

近年、青井講師らの研究グループは、ムカデの数理モデルを用いて、その歩行の力学解析を行いました。そのモデルは、1対の足を持つ体節が6つ、受動的な回転バネを介して直列に結合されたもので、足を往復運動することで歩きます。歩く速度が小さいと、6つの体節が平行のまま、体軸を真っ直ぐにして歩くのですが、ある速度より大きくなると、体軸にヘビのような蛇行運動が生じてきます。数理解析の結果、これは速度に応じたホップ分岐によるものであり、更にムカデの歩行計測データと比較して、直線歩行から蛇行への遷移、速度に応じた蛇行振幅や波長の変化など、ムカデに見られる特徴を捉えていることを明らかにしました。この成果はNature PhysicsのNews & Viewsで紹介されました。本研究では、この分岐による直線歩行の不安定性が急旋回のような素早く機敏な歩行生成に寄与することを、多足ロボットを用いた実験より明らかにしました。

## 2. 研究手法・成果

まず、様々なバネ定数を持つ回転バネを用いて多足ロボットの直線歩行実験を行い、体軸柔軟性に応じて速度と同様のホップ分岐が生じることを確認し、その分岐点となる体軸柔軟性を突き止めました。そして機敏な歩行として、最初体軸を真っ直ぐにして地面におかれた多足ロボットに対して、その進行方向からほぼ直角に外れた遠方の床上に置かれたターゲットに歩いて近づくような、急旋回実験を対象としました。その際、先頭の体節にはセンサを設置してターゲットとの相対位置を測定し、先頭の足の動かす方向だけをターゲットに向けるように制御しました。後続の体節が回転バネを介して先頭に追従することでロボット全体の進行方向を変えて、旋回を実現させました。この実験の結果、

- ・直線歩行が不安定で、安定・不安定が切り替わる分岐点近傍の体軸柔軟性を用いると、進行方向を即座に変え、スムーズな急旋回が実現できました。
- ・バネ定数が分岐点よりも大きく、直線歩行が非常に安定だと、進行方向を変えるのに時間がかかり、ターゲットに対するロボットの軌道も大きくずれました。
- ・バネ定数が分岐点よりも小さく、直線歩行が非常に不安定だと、進行方向は即座に変えられるのですが、隣り合う体節がぶつかってしまうなど、旋回後の歩行形態を維持することが困難でした。

すなわち、分岐による直線歩行の不安定性が、旋回歩行における機動性に寄与することが確認できました。ただし、不安定性が強すぎると歩行性能を損なうため、安定性と機動性はトレードオフの関係にあることも明らかになりました。ムカデのような多足歩行において、体軸柔軟性の制御による不安定性を利用した運動機能の向上は、生物の優れた運動戦略として重要な示唆を与えるものです。

## 3. 波及効果、今後の予定

ムカデだけでなく、ゴキブリのような敏捷に歩行する節足動物も、直線歩行の不安定性を利用していることが示唆されています。また、アシカなどの水生生物は、身体の柔軟性を制御して不安定性を利用することで、その遊泳における機動性を向上させることが示唆されています。生物は、複雑な環境でも巧みに移動することができますが、その力学的なメカニズムは未だ不明確です。本研究のような、数理モデルやロボットを用いた方法は、生物の巧みな運動機能の未解決な問題に対して、新たな方法を提供すると期待されます。

また、一般的な機械システムの制御では、そのシステムを安定化させることを重視しますが、本研究は

不安定性を積極的に利用することで優れた運動機能が実現できることを示しています。シンプルな制御ながら、不安定性などの特殊な力学特性を上手く利用して優れた運動機能を得ることは、今後様々な人工物の開発に役立つと期待されます。

#### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学研究費挑戦的萌芽研究（課題番号 23656185, 26630097）、および JST CREST の支援を受けました。

#### <論文タイトルと著者>

タイトル : Advantage of straight walk instability in turning maneuver of multilegged locomotion:  
a robotics approach

著者 : 青井伸也、田中隆浩、藤木聡一郎、船戸徹郎、泉田啓、土屋和雄

掲載誌 : Scientific Reports